

論文審査の要旨及び担当者

No.1

報告番号	甲 乙 第 号	氏 名	清水 修
論文審査担当者	主 査	政策・メディア研究科教授	環境情報学部教授 大前 学
	副 査	政策・メディア研究科教授	兼総合政策学部教授 小林 光
	副 査	政策・メディア研究科委員	兼環境情報学部教授 巖 網林
	副 査	環境情報学部名誉教授	清水 浩
学力確認担当者：			
(論文審査の要旨)			
<p>清水修君が提出した学位請求論文は、「電気自動車用ダイレクトドライブインホイールモータの高性能化に関する研究」と題し、全8章から構成されている。本論文では、電気自動車や燃料電池自動車等の電気駆動自動車の駆動モータにおいて、アウターロータ型ダイレクトドライブインホイールモータの高性能化と実車適用に関する研究成果を論じている。</p> <p>アウターロータ型モータとは、モータの内側を固定子、モータの外側を回転子とするものである。通常、模型等の目にする内側の軸が回転するモータ（インナーロータ）とは、逆の構造となっている。ダイレクトドライブとは、ギア等の減速機を介さず駆動する方式のこと指す。アウターロータ型ダイレクトドライブモータは、減速機やドライブシャフト等を介さず、直接自動車のタイヤを駆動できるため、動力伝達に伴う損失がほとんどなく、また軸のねじれやギアのバックラッシュ等がないため、高速な駆動力の制御を実現することが可能であり、インホイールモータにこれを適用した場合、高い効率性と制御応答性を持つ自動車を実現できる。一方で、アウターロータ型ダイレクトドライブモータは出力に対して大きなサイズが必要となるため、インホイールモータに適用しにくいと考えられていた。よって、従来開発されてきたインホイールモータは、そのほとんどがインナーロータ型のギアリダクションモータとなっている。</p> <p>著者は、博士課程在籍前の研究において、アウターロータ型ダイレクトドライブインホイールモータにおいて、磁石の配置の工夫により、乗用車のタイヤ径サイズであっても、必要十分なトルクが実現できることを数値計算シミュレーションにより明らかにした。博士課程の研究は、この知見の実証と言ってよく、実車搭載のためのアウターロータ型ダイレクトドライブインホイールモータの実機を設計・構築・評価し、大型バスに適用し、路線バスとして運行評価を行うことで、アウターロータ型ダイレクトドライブインホイールモータの自動車への適用可能性を実証した。さらに、評価結果により得られた課題の解決として、低振動化と高効率化のための手法を考案、具現化し、再度大型バスに搭載し、走行評価を行うことで、提案する低振動化や高効率化の手法の有効性を明らかにした。本論文は、その成果をまとめたものである。</p> <p>本論文の主たる内容は、前述のアウターロータ型ダイレクトドライブモータの車載および評価、低振動化、高効率化、実車搭載および評価であり、第3章から第7章がその部分に相当する。論文の章立てとしては、高効率化、低振動化、車載および評価の順となっている。第3章では、高効率化、第4章では低振動化の手法を提案している。第5章では、自動車への搭載として、大型バスへの適用のための要求性能に対するモータ設計とその評価について論じている。第6章、第7章は、走行評価、シミュレーション評価に関する章であり、それぞれ、本論文で提案する高効率化、低振動化の手法の適用の以前、以後の評価およびその結果について論じている。</p>			

論文審査の要旨及び担当者

No.2

第3章では、アウターロータ型ダイレクトドライブインホイールモータの高効率化手法の提案として、モータにおけるエネルギー損失要因を整理した上で、機械損失に着目し、その低減手法を提案している。ここでは、水やオイル等の流出、流入を防ぐシール機構の摺動抵抗が、大きな機械損失要因になっていることを見出し、アウターロータ型の特徴を踏まえた上、冗長なシール機構の除去や、形状の変更により、摺動抵抗に起因する機械損失を7割低減できることを示した。この章で提案、評価されている内容で、特に高く評価できる点は、モータの高効率化に関して、従来数多くの知見が報告されている電氣的損失ではなく、機械的損失に着目した点と、摺動抵抗の低減において、アウターロータ型インホイールモータの形状の特徴を活かした手法が提案している点である。

第4章では、アウターロータ型ダイレクトドライブインホイールモータの低振動化として、コギングトルクの低減手法を提案している。コギングトルクとは、モータの固定子と回転子の磁氣的な吸引力によって生じる脈動トルクであり、固定子と回転子の作用点が回転中心から離れているアウターロータ型モータでは、特に大きな回転振動の原因となるものである。従来、コギングトルクの解消手法は、円周方向に磁石をずらして、積層し、軸方向に対して斜めに配置する（スキューと呼ぶ）ことで、低減すると言われており、コギングトルクを抑制する二次元磁気解析の手法も提案されている。著者は、二次元磁気解析の手法により構成したスキューによるモータのコギングトルクの実測値が理論値から大きく乖離していることを実験により明らかにし、その原因が積層した磁石間の磁気短絡にあることを見出した。そこで、積層する磁石の間に磁気バリアを導入することで、磁気短絡を防止し、コギングトルクを大きく減少する手法を考案し、その有効性を実証した。この章で提案、評価されている内容で、特に高く評価できる点は、以下の二点である。一点目は、従来の二次元解析によるコギングトルク評価手法が、現実の値と大きく乖離することを実証的に示した点であり、二点目は、理論値と実測値の乖離の原因が磁気短絡あることを明らかにし、磁気バリアの導入によりコギングトルクの低減を実現した点である。

第5章、第6章では、アウターロータ型ダイレクトドライブインホイールモータの実車への適用として路線バスに用いる大型バスへの適用について、その要求仕様やモータ設計、および評価について論じている。この章で特に高く評価できる点は、実際に自動車に適用できるモータを開発した点である。これに加え、バスへの適用自体は、著者の着想でないが、モータを搭載する対象車を大型バスとした意義は大きいと考える。バスは、荷重の変動が大きくや、頻繁な加減速を伴う運用をされるだけでなく、大量の旅客輸送に供される自動車として高い信頼性が求められる。すなわち、バス車体で適用可とされる認証を得るだけの信頼性を持つことは、他の多くの車種への適用もカバーするものである。従来、インホイールモータは、超小型車等の比較的軽負荷な車体への実証例が多い中、バスという、最もハードルの高い対象に、路線バスとしての運用の実現を達成したことは高く評価できる。また、内燃機関自動車では、車種ごとに、必要とされる出力を実現するエンジンが搭載されているが、本研究では、乗用車のタイヤサイズのモータを、多輪化してバスに搭載することで、必要な駆動力を実現するという手法をとっている。これは、一種類のモータを用いながらも、駆動車輪数を変えることに、様々な車種に対応できることを示すものであり、インホイールモータならではの、自動車設計のあり方を体現したという点でも高く評価できる。

第7章では、第3章、第4章で提案したアウターロータ型ダイレクトドライブインホイールモータの高効率化、低振動化手法の走行評価、走行条件に基づくシミュレーション評価について述べている。第3章、第4章の提案は、第6章の走行評価結果を踏まえての取り組みであるが、モータの単体試験に留めず、再度バスに改良モータを搭載して評価している点が評価できる。

論文審査の要旨及び担当者

No.3

本論文は、従来出力に対して大きなサイズが必要となると考えられていたアウターロータ型ダイレクトドライブモータの車載可能性を実証し、さらなる高性能化の手法を示した研究である。著者は、博士課程在籍前の「アウターロータ型ダイレクトドライブモータにおいても適正な磁石配置で構成すれば、インホイールモータを合理的なサイズで、自動車の駆動に必要な出力を実現できる」という電磁界解析シミュレーションに基づく仮説を、軽量の試作車によるテスト走行等ではなく、実際の路線バスとして旅客輸送に供される大型のバスにおいて実証した。これだけに留まらず、独創的な着眼、手法により、アウターロータ型ダイレクトドライブモータのさらなる高効率化、低振動化手法も提案した。本論文の成果は、今後益々増える可能性の高い電動自動車（電気自動車、燃料電池車、レンジエクステンダ型電気自動車等）の駆動モータに関する有用性の高い知見をもたらすものである。アウターロータ型ダイレクトドライブインホイールモータは、第二段落でも述べたように、減速機やドライブシャフトが無いいため、効率が高く、高い周波数で制御することも可能であるため、電動自動車の優位性や付加価値を高めるものである。そして、電動自動車の普及は、自動車交通の省エネルギー化に寄与する。

本論文に対する以上の評価により、その著者である清水修君は、先端的な研究を行うための高度な研究能力とその基礎となる豊かな学識を有することを示したといえる。よって本委員会は、清水修君が、博士（学術）の学位を受ける資格があるものと認める。